

文章编号: 1001-5132(2004)01-0061-05

# 船舶碰撞危险度模型的构建

周江华<sup>1</sup>, 吴春杰<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 公安海警高等专科学校, 浙江 宁波 315801)

**摘要:** 运用模糊数学的综合评判理论, 把会遇中目标船的  $DCPA$ 、 $TCPA$ 、两船距离、相对方位、船速比 5 个因素作为基本评判参数, 建立碰撞危险度的评价模型. 而将其它因素, 如航行区域状况、能见度情况和船舶的操纵性能等, 作为对上述因素的危险隶属度函数的修正加以考虑. 引入了船舶领域、动界等概念, 以对来船构成的本船危险度进行客观有效地评价, 为安全避碰提供合理依据.

**关键词:** 碰撞危险度; 模糊数学综合评判理论; 数学模型

**中图分类号:** U675.96

**文献标识码:** A

## Construction of the Collision Risk Factor Model

ZHOU Jiang-hua<sup>1</sup>, WU Chun-jie<sup>2</sup>

(1. Maritime College of Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Public Security Marine Police Academy, Ningbo 315801, China)

**Abstract:** An evaluation model for collision risk factor by applying the comprehensive assessment theory of fuzzy mathematics is proposed based on the five factors such as the distance of closest point of approach, time to the closest point of approach, distance of target ship, relative bearing and speed ratio, together with navigational surroundings, visibility and maneuverability etc. Concepts of "domain" and "arena" are established for the objective and effective assessments of risk factors from other vessels. It offers reasonable evidences for collision avoidance.

**Key words:** collision risk factors; comprehensive assessment theory of fuzzy mathematics; mathematical model

**CLC number:** U675.96

**Document code:** A

在船舶避碰和避碰决策领域中, 碰撞危险度是一个基本的概念, 它是划分船舶会遇局面, 确定采取避让行动时机的重要依据, 更是开发船舶自动避碰智能系统的关键环节. 因此, 如何客观准确地评价船舶碰撞危险度, 成了许多专家、学者研究的一个重要课题, 近年来, 取得了许多可喜的成果<sup>[1~4]</sup>. 但是, 由于碰撞危险度这个概念本身所具有的模糊性、复杂性, 在国内外的研究中, 并没有形成一种统一的评价理论. 本文试图运用模糊数学的综合评判理论, 并引

入船舶领域、动界等概念, 建立数学模型, 以对来船构成的本船危险度进行客观有效的评价.

## 1 碰撞危险度评价模型的建立

已知会遇中目标船的参数为:  $DCPA$ 、 $TCPA$ 、两船距离( $D$ )、相对方位( $B$ )和船速比( $K$ ), 由目标船参数构成的目标因素集:

$$U = [DCPA, TCPA, D, B, K]$$

其中  $K$  为目标船航速与本船航速之比.

收稿日期: 2003-12-17.

基金项目: 浙江省教育厅资助项目(20030484).

第一作者简介: 周江华(1965-)男, 汉族, 浙江上虞人, 副教授.

目标船评语集:

$$V=[r_1, r_2],$$

其中  $r_1$  为目标危险,  $r_2$  为目标安全.

目标因素的权重分配为:

$$A=(a_{DCPA}, a_{TCPA}, a_D, a_B, a_K),$$

其中  $a_{DCPA}$ 、 $a_{TCPA}$ 、 $a_D$ 、 $a_B$ 、 $a_K$  均大于 0, 小于 1, 且

$$a_{DCPA}+a_{TCPA}+a_D+a_B+a_K=1.$$

目标评判矩阵为:

$$R=\begin{Bmatrix} r_{DCPA} & 1-r_{DCPA} \\ r_{TCPA} & 1-r_{TCPA} \\ r_D & 1-r_D \\ r_B & 1-r_B \\ r_K & 1-r_K \end{Bmatrix},$$

其中  $r_{DCPA}$ 、 $r_{TCPA}$ 、 $r_D$ 、 $r_B$ 、 $r_K$  均属于  $[0, 1]$ ,  $r_{DCPA}$ 、 $r_{TCPA}$ 、 $r_D$ 、 $r_B$ 、 $r_K$  为目标船危险隶属度, 即目标船各参数对本船造成危险的程度.

目标综合评判结果为  $E=A \circ R$ .

综上所述各式可以推导出:

$$E=[(a_{DCPA}r_{DCPA}+a_{TCPA}r_{TCPA}+a_Dr_D+a_Br_B+a_Kr_K), \\ 1-(a_{DCPA}r_{DCPA}+a_{TCPA}r_{TCPA}+a_Dr_D+a_Br_B+a_Kr_K)].$$

$E$  满足归一化条件,  $E$  中第一评语为“目标危险”的评价结果, 即目标船碰撞危险度; 第二评语为目标船安全度. 因此, 目标船碰撞危险度表达为:

$$e=a_{DCPA}r_{DCPA}+a_{TCPA}r_{TCPA}+a_Dr_D+a_Br_B+a_Kr_K.$$

由此可见, 目标船的碰撞危险度为目标船参数  $DCPA$ 、 $TCPA$ 、 $D$ 、 $B$ 、 $K$  对本船的危险度  $r_{DCPA}$ 、 $r_{TCPA}$ 、 $r_D$ 、 $r_B$ 、 $r_K$  的加权之和. 目标船碰撞危险度取值范围为  $0 \leq e \leq 1$ .

经过计算可以得到目标船碰撞危险度的值, 若该值为 0, 则目标船安全; 若该值为 1, 则目标船危险; 若处于  $[0, 1]$  之间, 则该值越大, 危险性越大.

## 2 模型中各参数的危险隶属度

### 2.1 几个概念

在确定评价模型的各隶属函数前, 首先引入船舶领域、动界、最晚施舵距离 3 个概念. 每艘船舶的上述 3 个参数并非固定的, 而是根据航行水域、能见度、通航密度、本船的操纵性能、风流的情况、航速、吃水和可用吃水的关系、船吸的可能性、雷达等设备的误差以及避碰规则的通常做法等因素确定的.

#### 2.1.1 船舶领域

船舶领域也称为避碰领域, 是指每艘船舶周围的有效区域. 该船驾驶员将它船和其他物标保持在该区域之外, 是船舶保证安全航行所需的最小水域. 荷兰学者 Van Ddr Tak 等<sup>[7]</sup>通过调查确定了船舶吨位为 1 600 ~ 15 000 t 之间的杂货船和干散货船的船舶领域的模型(即标准领域)(图 1).

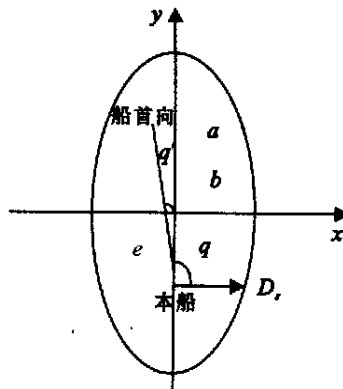


图 1 船舶领域模型

Fig. 1 Domain model

设半径为  $D_s$ , 建立平面直角坐标(图 1), 应用解析几何的方法, 可推导其表达式为:

$$D_s=f \cdot \left[ \frac{b^2 e \cos(q-q')}{a^2 \sin^2(q-q') + b^2 \cos^2(q-q')} + \frac{ab \sqrt{b^2 \cos^2(q-q') + (a^2 - e^2) \sin^2(q-q')}}{a^2 \sin^2(q-q') + b^2 \cos^2(q-q')} \right].$$

其中取  $a=0.90$  n mile,  $b=0.75$  n mile,  $e=0.25$  n mile;  $q'$  为本船船首向偏离椭圆长轴之左的角度, 取  $q'=1^\circ$ ;  $q$  为来船 CPA 点的圆周舷角;  $f$  为乘法因子.

根据船舶的操纵性、驾驶员的资历、心理因素、反应时间确定不同吨位和种类的其他船舶的乘法因子  $f$ <sup>[7]</sup>. 这样可以得到各种船舶的领域尺寸.

#### 2.1.2 动界

所谓动界就是以驾驶人员开始采取行动以避免紧迫局面时与它船的距离为基础的超级领域. 英国学者 Davis 等通过大量的调查统计得到了动界模型的具体数据, 在进行平滑其边界的处理后, 得到的模型是一个半径为 2.7 n mile 的圆, 本船距圆心 1.7 n mile, 方位  $199^\circ$ (图 2).

设其区域半径为  $R$ , 可以得到其表达式:

$$R=1.7 \cos(B-19^\circ) + \sqrt{4.4+2.89 \cos^2(B-19^\circ)},$$

其中  $B$  为来船的相对方位, 且  $0^\circ \leq B < 360^\circ$ .

#### 2.1.3 最晚施舵距离(DLA)

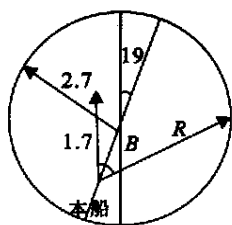


图2 动界模型

Fig. 2 Arena model

最晚采取避碰行动时两船距离, 指当两船存在碰撞危险时, 本船采取舵让最晚点的两船间距. 若小于该距离采取避让行动, 即使幸免碰撞, 也会形成紧迫局面. 本文对此不做具体论证, 根据统计研究, 并从安全的角度考虑一般约为 12 倍的船长<sup>[8]</sup>.

## 2.2 隶属函数的确定

分析碰撞危险度的评价表达式, 可以发现: 在目标船各参数权重值确定的情况下, 隶属度函数描述的准确性, 直接影响船舶碰撞危险度评价的可靠性, 也决定着所建模型的实用性, 因此, 要认真研究, 仔细分析, 准确确定各隶属函数.

### 2.2.1 DCPA 的危险隶属度函数

DCPA 对本船造成的危险程度很明显, 该值越大, 危险程度越小, DCPA 的危险隶属度函数  $U(DCPA)$ <sup>[9]</sup> 为:

$$U(DCPA) = \begin{cases} 1, & 0 \leq DCPA \leq d_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[ \frac{180^\circ}{d_2 - d_1} \left( DCPA - \frac{d_2 + d_1}{2} \right) \right], & d_1 < DCPA \leq d_2 \\ 0, & d_2 < DCPA \end{cases}$$

其中  $d_1$  为船舶安全会遇距离,  $d_2$  为绝对安全会遇距离, 两者构成安全域.

(1) 若来船 DCPA 小于  $d_1$ , 则其对本船已构成了碰撞危险(即此时碰撞危险隶属度为 1), 需要采取一定的避让措施. 其值受到航行区域状况和能见度因素等影响, 在这里, 取:

$$d_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot (D_S - FBD).$$

式中  $K_1$  由能见度因素决定, 可根据大量的统计得到其具体值;  $K_2$  根据当前水域情况决定, 其确定方法与  $K_1$  大致相同. 当能见度不良时, 扩大  $d_1$  值, 以增大预警范围; 在复杂水域, 比如沿岸航行, 由于航行水域受限, 故  $d_1$  值应减少.  $FBD$  为船舶领域模糊边界值,  $FBD = 0.276 D_S$ <sup>[3]</sup>.

(2) 取  $d_2 = K_4 \cdot d_1^{1.10}$ . 其含义为若来船的 DCPA 大于  $d_2$ , 则无论如何对本船都不会构成碰撞危险. 其中  $K_4$  为系数, 由船舶状态的不稳定性、两船行动的不协调, 以及设备的误差等因素确定, 一般情况可取  $K_4 = 2$ .

### 2.2.2 TCPA 的危险隶属度函数

TCPA 对本船造成的危险程度也同样明显, 该值越大, 危险程度越小, TCPA 的危险隶属度函数  $U(TCPA)$ <sup>[4]</sup> 为:

$$U(TCPA) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |TCPA| \leq t_1 \\ \left( \frac{t_2 - |TCPA|}{t_2 - t_1} \right)^2, & t_1 < |TCPA| \leq t_2 \\ 0, & t_2 < |TCPA| \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\sqrt{D_1^2 - DCPA^2}}{V_R} \text{ (当 } DCPA \leq D_1 \text{)}, \\ t_1 = \frac{D_1 - DCPA}{V_R} \text{ (当 } DCPA > D_1 \text{)}, \\ t_2 = \frac{\sqrt{D_2^2 - DCPA^2}}{V_R}. \end{cases}$$

### 2.2.3 两船距离的危险隶属度函数

由文献[2]可知, 距离目标越近, 目标船对本船造成的危险程度越大, 两船距离的危险隶属度函数  $U(D)$  为:

$$U(D) = \begin{cases} 1, & 0 \leq D \leq D_1 \\ \left( \frac{D_2 - D}{D_2 - D_1} \right)^2, & D_1 < D \leq D_2 \\ 0, & D_2 < D \end{cases}$$

其中  $D_1$  为最晚避让距离, 而  $D_2$  为可采取避让措施距离. 其值均受到航行区域的状况, 能见度状况以及人为因素的影响. 因此取:

$$D_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot DLA,$$

$$D_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot R.$$

式中  $K_3$  由人为因素确定, 包括操船者的经验、技术、反应能力以及心理素质等等. 当操船者素质较好时,  $K_3$  偏小; 而当操船者素质较差时,  $K_3$  偏大.

### 2.2.4 相对方位的危险隶属度函数

不同方位的来船对本船所构成的危险程度不同, 一般来说, 右舷大于左舷, 正横前大于正横后. 上面已引入了动界的概念, 对于动界, 如果从相对方位的角度来认识, 那就是: 在其他条件相同的情况下, 当来船位于本船  $19^\circ$  舷角时最危险, 我们设定其危险

隶属度为 1; 而当位于  $199^\circ$  时最安全, 其危险隶属度为 0. 根据上述动界半径公式, 经过处理后, 可以得到来船方位的危险隶属度函数  $U(B)$ :

$$U(B) = \frac{1}{2} [\cos(B - 19^\circ) + \sqrt{\frac{440}{289} + \cos^2(B - 19^\circ)}] - \frac{5}{17}, (0 \leq B < 360^\circ)$$

### 2.2.5 船速比的危险隶属度函数

如果会遇中船舶的其他条件相同, 而只有船速比不同时, 其所造成的碰撞危险也会不同. 根据文献 [1] 关于船舶在避碰过程中转向避让的表达式, 即避让后得到的新的  $DCPA$  的表达式:

$$DCPA = \frac{2D \sin \frac{\Delta C}{2} \cos \left( Q - \frac{\Delta C}{2} \right)}{K \sqrt{K^2 + 1 - 2K \cos(C + \Delta C)}}.$$

这里, 假设  $D$ 、 $Q$  为常数,  $\Delta C$  为  $90^\circ$ , 可以得到新的  $DCPA$  与船速比和碰角的函数关系:

$$DCPA = \frac{W}{K \sqrt{K^2 + 1 + 2K \sin C}}$$

$W$  为常数,  $C$  为碰角且  $0 \leq C < 180^\circ$ .

由此可知, 船速比越大, 所得到的  $DCPA$  越小. 这个结论可以这样来表达, 在相同的两船距离, 相同碰角的情况下, 采取相同的转向幅度时, 若船速比越大, 则转向后得到的新的  $DCPA$  越小. 同时, 船速比越大, 即本船越慢, 则转舵效果越差, 所需要采取行动的时机要早. 因此, 可以得到这样的结论: 船速比越大, 碰撞危险度越大. 根据上面公式, 建立船速比的危险隶属度函数  $U(K)$ :

$$U(K) = \frac{1}{1 + \frac{W}{K \sqrt{K^2 + 1 + 2K \sin C}}}. (K \geq 0, \text{取 } W=2)$$

## 3 危险度的排序及等级

对于影响碰撞危险度的诸多因素, 这 5 个参数的重要性次序为  $DCPA$ ,  $TCPA$ ,  $D$ ,  $B$ ,  $K$  (即  $a_{DCPA} > a_{TCPA} > a_D > a_B > a_K$ ). 根据大量统计研究, 可以确定其具体的权重值, 在这里, 取  $a_{DCPA} = 0.36$ ,  $a_{TCPA} = 0.32$ ,  $a_D = 0.14$ ,  $a_B = 0.10$ ,  $a_K = 0.08$ .

根据  $e$  值的大小, 可以把碰撞危险度划分以下 5 级:

- I 1.00 ~ 0.81 危险最大;
- II 0.80 ~ 0.61 危险较大;
- III 0.60 ~ 0.41 危险中等;

IV 0.40 ~ 0.21 危险较小;

V 0.20 ~ 0 危险最小;

其中 I 级危险最大, 即为紧迫局面; V 级危险最小, 仅存在两船碰撞的可能性.

## 4 验证

杂货船  $A$  在开阔海域, 以航向  $000^\circ$ , 航速 15 kn 航行. 已知本船船长 75 m, 吨位 5 000 t, 此时能见度良好, 操船者水平较好, (即  $K_1 = 1$ ,  $K_2 = 1$ ,  $K_3 = 1$ ), 取  $DLA = 1'$ . 于 1530 时在  $ARPA$  上获取以下数据: 来船位于本船的方位  $B$  为  $29.5^\circ$ ,  $D$  为  $3'$ , 相对运动速度为 26.2 kn,  $DCPA$  为  $0.4'$ ,  $TCPA$  为 7 min, 评价此时来船相对本船的碰撞危险度.

(1) 利用所建模型验证.

1) 将有关数据整理, 并代入相关的公式, 可以求得:

$$U(DCPA) = 1,$$

$$U(TCPA) = 0.140,$$

$$U(D) = 0.162,$$

$$U(B) = 0.986,$$

$$U(K) = 0.408.$$

2) 代入关于碰撞危险度的综合评价公式, 可得:

$$e = a_{DCPA} U_{DCPA} + a_{TCPA} U_{TCPA} + a_D U_D + a_B U_B + a_K U_K = 0.559.$$

结论: 属于 IV 级, 即危险中等.

(2) 利用有关文献<sup>[1]</sup>中危险度的评价模型.

可以得出:

$$U(DCPA) = 0.883,$$

$$U(TCPA) = 0.460,$$

$$U(D) = 0.477,$$

$$U(B) = 0.650.$$

且危险度权重值取  $a_{DCPA} = a_{TCPA} = 0.38$ ,  $a_D = a_B = 0.12$ , 则  $e = 0.650$ .

结论: 危险较小.

(3) 根据上述两组危险度值, 进行比较分析, 可知: 利用该模型对船舶碰撞危险度评价, 所得结果与其他评价模型存在一定的差异, 即前者为危险度中等, 而后者为危险度较小, 其相对差异率达 16.3%, 其主要原因是模型中各因素权重值, 以及辅助参数等, 多取于经验数据或者大量的统计研究, 并不一定完全符合实际情况, 而且对于各因素危险度隶属函数的描述, 也存在着差异, 这也促使我们设法改善模

型, 以更适合实际情况.

5 结束语

(1) 本文采用模糊数学的综合评判理论, 建立船舶碰撞危险度的评判模型, 实现了多种因素的综合评判, 并且能够利用人们已有的经验, 较好地表现避碰的决策过程. 对于不同航区, 不同会遇局面, 可以对目标因素的权重分配进行调整, 以实现船舶碰撞危险度的综合评判.

(2) 本文引入了船舶领域、动界等概念, 并以此为基础建立相关数学模型, 达到对来船构成的本船危险度进行客观有效地评价的目的. 但是对于领域和动界的模型都采用一定的理想模型, 而它们均存在局限性, 而且对于它们的认识也正处在一种研究的阶段, 其准确性有待进一步研究.

参考文献:

[ 1 ] 赵劲松, 王逢辰, 今津隼马. 船舶避碰学原理[ M ]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.

[ 2 ] 郑中义, 吴兆麟. 船舶避碰决策[ M ]. 大连: 大连海事大学出版社, 2000. 130 ~ 188.

[ 3 ] 赵劲松, 王逢辰. 确定避碰时机的模型[ J ]. 大连海运学院学报, 1989, 15( 5 ): 1 ~ 6.

[ 4 ] 严庆新. 船舶碰撞危险度评判模型[ J ]. 武汉理工大学学报, 2002, 26( 2 ): 77 ~ 79.

[ 5 ] 姚杰, 吴兆麟, 方祥麟. 船舶碰撞危险的模糊决策[ J ]. 大连水产学院学报, 1998, 13( 2 ): 29 ~ 34.

[ 6 ] 严庆新. 船舶碰撞的定量研究[ J ]. 武汉交通科技大学学报, 1999, 21( 6 ): 688 ~ 694.

[ 7 ] 吴兆麟. 海上交通工程[ M ]. 大连: 大连海运学院出版社, 1993.

[ 8 ] 大连海运学院船艺教研室. 船艺[ M ]. 北京: 人民交通出版社, 1980.

[ 9 ] 刘宇宏, 陈洪波, 郝燕玲. 一种基于模糊原理的碰撞危险度模型[ J ]. 中国航海, 1998( 2 ): 23 ~ 29.

[ 10 ] 邱志雄, 兰培真. 船舶避碰综合决策系统[ J ]. 大连海运学院学报, 1992, 18( 3 ): 247 ~ 253.

[ 11 ] 周江华, 郑道昌. 船舶航行自动避让研究[ J ]. 中国航海, 2003( 3 ): 44 ~ 45.

( 责任编辑 洪明照 )

我校 6 项科研成果分获宁波市  
科技进步奖二等奖、三等奖

宁波市人民政府下达文件( 甬政发[ 2004] 4 号 ), 公布了 2003 年度宁波市科学技术进步奖获奖项目. 我校共有 6 项科研成果获奖. 其中阮航宇、陈黎丽完成的“高维可积模型的研究”项目荣获二等奖。

另有 5 个项目荣获三等奖. 它们分别是: 由陶祥兴、张松艳承担完成的“小波分析调和与分析应用研究”, 由蔡泽伟、宋晓刚、祝会兵、叶春阳承担完成的“宁波沿海岸线积淤和港口积淤治理”, 由汪鹏君、夏银水、吴训威、叶锡恩承担完成的“多值施密特触发器及高信息密度脉冲电路的研究”, 由冯志敏、王颖、胡志刚、王炳辉、胡海刚、蒲龙云、刘默承担完成的“智能化扭振实时监测与诊断系统开发研究”, 由许继琴等承担完成的“宁波市农业科技发展的形势与对策研究”。